

文章编号: 1000-7032(2016)05-0583-08

# 基于人造金刚石晶体的拉曼激光器研究进展

陈志琼<sup>1,2</sup>, 付喜宏<sup>1\*</sup>, 张 俊<sup>1</sup>, 彭航宇<sup>1</sup>

(1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 受激拉曼散射是一种重要的非线性光学频率变换技术,在拓展激光波段方面有十分广泛的应用前景。因此,寻找具有优良光学性质的拉曼介质,提高拉曼激光器性能,具有重要的研究价值。相比于传统的固体拉曼晶体,人造金刚石晶体具有拉曼增益系数大、拉曼频移大、导热率高和透过性好等显著优点,基于人造金刚石晶体的拉曼激光器能够获得更高的输出功率和转换效率。本文简要介绍了化学气相沉积法(CVD)制备的金刚石晶体的光学性质和热学特性,总结了基于人造金刚石晶体的拉曼激光器在紫外波段、可见光波段及红外波段的研究现状,并对其发展进行了展望。

**关 键 词:** 人造金刚石; 受激拉曼散射; 拉曼激光器

**中图分类号:** O437.3; TN248

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/fjxb20163705.0583

## Development of Raman Laser Based on Synthetic Diamond Crystal

CHEN Zhi-qiong<sup>1,2</sup>, FU Xi-hong<sup>1\*</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, PENG Hang-yu<sup>1</sup>

(1. State key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Author, E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn

**Abstract:** Stimulated Raman scattering(SRS) is a kind of efficient nonlinear optical frequency conversion technology to extend laser wavelength range, and it has extensive prospects for various applications. Thus, it is important to develop new Raman medium with excellent optical properties and improve the performance of Raman laser. Compared with conventional Raman materials, diamond grown by chemical vapor deposition (CVD) has high Raman gain coefficient, large Raman frequency shift, outstanding thermal conductivity and broad optical transmission range. These properties are beneficial to raise average output power and conversion efficiency of Raman laser. In this paper, the optical and thermal properties of the CVD diamond were introduced briefly, and researches on Raman lasers based on synthetic crystal diamond were summarized in ultraviolet, visible and infrared range, respectively. Finally, the development of diamond Raman lasers was forecasted.

**Key words:** synthetic diamond; stimulated Raman scattering; Raman laser

收稿日期: 2016-01-09; 修订日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(61405190); 吉林省科技发展计划(N20150101041JC); 国家科技重大专项(2014ZX04001151) 资助项目

## 1 引 言

随着激光在通讯、军事、医药、工业等众多领域中日益广泛的应用,现有激光波长已不能很好地满足实际应用的需求。因此,扩展激光波段成为激光技术中一项重要的研究内容。目前,拓展激光波段的主要方式主要有两种:一是开发新的工作物质;二是利用非线性光学频率变换技术。其中,非线性光学频率变换技术又分为两种:一是以和频、差频、光学参量振荡技术为代表的弹性作用;二是以受激拉曼散射和受激布里渊散射技术为代表的非弹性作用。受激拉曼散射作为一种重要的非线性光学频率变换方法,不仅可以实现激光的频率变换,填补传统激光器尚未实现的激光波段,而且对光束有净化作用,能够获得高光束质量的激光输出。

固体拉曼介质与气体、液体拉曼介质相比,具有增益系数大、导热率高等优点。以固体为介质的拉曼激光器结构紧凑、输出功率高、可实现高重频运转。传统的拉曼晶体有  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ <sup>[1-3]</sup>、 $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ <sup>[4]</sup>、 $\text{YVO}_4$ <sup>[5]</sup>、 $\text{LiO}_3$ <sup>[6]</sup> 等,与这些晶体相比,人造金刚石晶体具有拉曼增益系数大、导热率高、透过性好等优点,是一种优良的拉曼晶体而被用于非线性光学频率变换。

天然金刚石因其拉曼频移量大、拉曼增益系数大、导热率高而成为一种潜在的拉曼晶体。但是,天然金刚石晶体的光学质量差,在作为拉曼介质方面的发展受到了限制。上个世纪 90 年代初,科研人员利用化学气相沉积(CVD)等晶体生长技术实现了人造金刚石晶体的制备<sup>[8-10]</sup>。由于早期的人造金刚石晶体含杂质较

多、对拉曼光的吸收率非常大,无法实现光学应用。从 2000 年开始,随着晶体生长技术的快速发展,人们得以实现高光学质量的人造金刚石晶体。之后,Praver<sup>[11]</sup>、Goncharov<sup>[12]</sup>、Giorgio<sup>[13]</sup>等测量了 CVD 法制备的人造金刚石晶体的光学性质,发现其具有良好的透过性,能够实现光学应用。起初,研究人员利用掺杂的人造金刚石作为激光工作物质<sup>[14]</sup>获得激光输出,但是由于转换效率低且人造金刚石晶体掺杂难度大,导致该方面的研究逐渐减少。随后,凭借透过性的改善,人造金刚石晶体作为一种优良的拉曼晶体引起人们的注意。之后,研究人员在这一方面开展了大量研究工作。

## 2 基于人造金刚石晶体的拉曼激光器的研究现状

与传统的拉曼晶体相比,人造金刚石晶体具有拉曼增益系数大、导热率高、透过性好等优点,是一种优良的拉曼晶体(表 1)。2008 年至今,澳大利亚 Macquarie 大学的研究人员在基于人造金刚石晶体的外腔式拉曼激光器方面做了大量工作<sup>[14-26]</sup>,实现了高功率、高效率的拉曼激光输出。2009 年至今,英国 Strathclyde 大学的研究人员在基于人造金刚石晶体的内腔式拉曼激光器方面做了相关研究<sup>[17-22]</sup>,获得了波长可调谐的拉曼激光输出。此外,美国<sup>[23]</sup>、捷克<sup>[24]</sup>等国家的研究人员也分别开展了基于人造金刚石晶体的拉曼激光器的相关研究,国内尚未有相关研究报道。

目前,基于人造金刚石晶体的拉曼激光器已经实现了紫外、可见、近红外、中红外波段的激光输出,下文将对其发展现状进行介绍。

表 1 室温下常见拉曼晶体性质对比

Tab. 1 Comparison of material parameters of Raman crystal at room temperature

| 材料                          | 拉曼频移量/ $\text{cm}^{-1}$ | 拉曼线宽/ $\text{cm}^{-1}$ | 可透过光范围/ $\mu\text{m}$ | 热致双折射系数/ $(10^{-6} \text{ K}^{-1})$ | 导热率/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 热膨胀系数/ $(10^{-6} \text{ K}^{-1})$ | 拉曼增益系数/ $(\text{cm} \cdot \text{GW}^{-1})$<br>@ 1 064 nm |
|-----------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Diamond                     | 1 332.3                 | 1.5                    | >0.23                 | 15                                  | 2 000                                                     | 1.1                               | 17                                                       |
| $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  | 1 047.3                 | 0.4                    | 0.35 ~ 1.8            | -20                                 | 1.17                                                      | 18.2                              | 11                                                       |
| $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ | 768/901                 | 7.8/5.9                | 0.34 ~ 5.5            | -4.3 ~ 5.5                          | 2.6(a) / 3.8(b) / 3.4(c)                                  | 4.0(a) / 1.6(b) / 8.5(c)          | 3.5                                                      |
| $\text{YVO}_4$              | 890                     | 3.0                    | 0.5 ~ 5.0             | 3(a) 8.5(c)                         | 5.2                                                       | 4.43                              | 4.5                                                      |
| $\text{LiO}_3$              | 770/822                 | 5.0                    | 0.31 ~ 4.0            | -95                                 | 4.0                                                       | 28(a) / 48(c)                     | 4.8                                                      |

## 2.1 深紫外波段

与其他拉曼晶体相比,人造金刚石晶体在 270 ~ 320 nm 紫外波段以及大于 6  $\mu\text{m}$  红外波段具有良好的透过性(图 1),这些波段的激光在传感器、国防、材料处理等领域有广泛应用。2011 年,Granados 等<sup>[4]</sup>利用经四次谐波后的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器做泵浦源(图 2),实现了脉冲能量为 0.96 nJ 的 275.7 nm 紫外波段的激光输出。然而,虽然在这一波长处人造金刚石的拉曼增益系数很大(100 cm/GW),但是,这一波段的双光子吸收效应导致其转换效率很低(10%)。

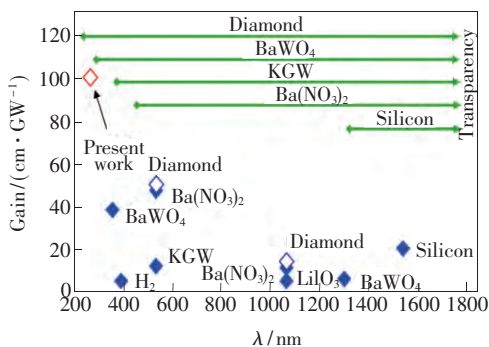


图 1 人造金刚石与其他典型的拉曼晶体在短波波段的透过性及拉曼增益系数对比<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Gain coefficient and short wavelength transmission range of synthetic diamond compared with conventional Raman materials<sup>[4]</sup>

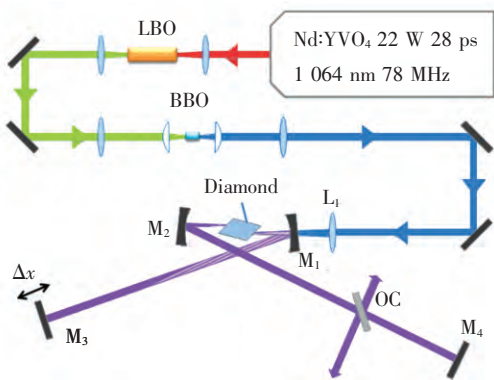


图 2 基于人造金刚石的 275.7 nm 拉曼激光器装置图<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Experimental setup of diamond Raman laser operating at 275.7 nm<sup>[4]</sup>

## 2.2 可见光波段

2008 年,Mildren 等<sup>[5]</sup>利用调 Q 倍频输出的 532 nm 激光器作为泵浦源,采用外腔结构,得到了最大脉冲能量为 0.3 mJ、斜率效率为 22% 的 573 nm 脉冲激光输出,验证了人造金刚石作为拉曼晶体的可行性。2013 年,Mildren

等<sup>[6]</sup>又进一步探讨了泵浦光传播方向(图 3)和偏振方向(图 4)对人造金刚石拉曼增益系数的影响。图 4 中, $g_s$ 为归一化的拉曼增益系数、 $I_p$ 为斯托克斯光偏振分量、 $I_{up}$ 为斯托克斯光未偏振分量,三者具有如下关系: $g_s \propto I_p + I_{up}/2$ 。结合理论模型与实验结果,Mildren 等发现,当泵浦光沿  $\langle 110 \rangle$  传播、 $\langle 111 \rangle$  方向偏振时具有最大的拉曼增益系数。

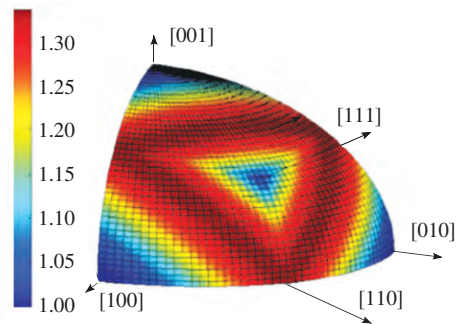


图 3 归一化的拉曼增益系数随泵浦光传播方向的变化关系<sup>[6]</sup>

Fig. 3 Normalized Raman gain coefficient as a function of the propagation direction<sup>[6]</sup>

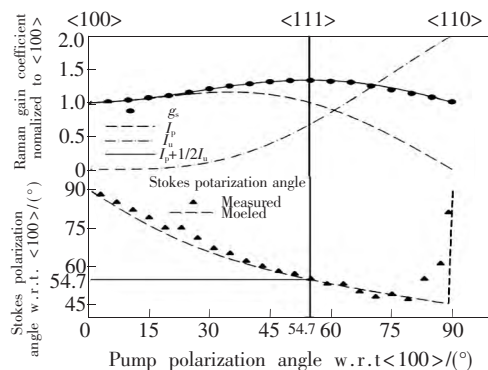


图 4 泵浦光沿  $\langle 110 \rangle$  方向传播时归一化的拉曼增益系数(上图)、斯托克斯光偏振方向(下图)与泵浦光偏振方向的关系<sup>[6]</sup>

Fig. 4 Normalized gain coefficient  $g_s$  (upper) and the Stokes polarization direction (lower) as a function of the polarization direction of pump laser for propagation along  $\langle 110 \rangle$  axes<sup>[6]</sup>

由此可见,为得到高效的拉曼激光器需要对泵浦光的传播方向和偏振方向进行选择。通常,晶体的热致双折射或其他因素会导致斯托克斯光偏振态的改变,从而引起拉曼增益系数的降低,但是金刚石的热致双折射系数低( $15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ),高温下激光的偏振态改变较小,可保证拉曼激光器在高温(高功率)下稳定高效运转。

2015 年, Schlosser 等<sup>[27]</sup> 利用 675 nm 输出的半导体碟片激光器做泵浦源, 采用内腔结构(图 5), 实现了 736.6 ~ 750.4 nm 的红光输出, 在 741.5 nm 处的输出功率为 70 mW。

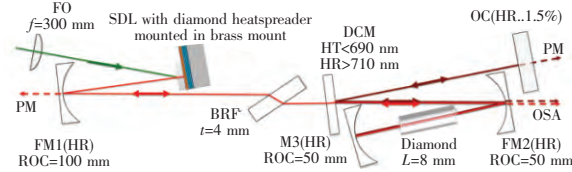


图 5 基于人造金刚石的 736.6 ~ 750.4 nm 拉曼激光器实验装置图<sup>[27]</sup>

Fig. 5 Experimental setup of 736.6 ~ 750.4 nm Raman laser based on synthetic diamond<sup>[27]</sup>

### 2.3 近红外波段

2010 年, Sabella 等<sup>[17]</sup> 采用外腔结构, 实现了功率为 2 W 的 1 240 nm 脉冲激光输出。实验发现, 在高功率泵浦时产生的二级斯托克斯光降低了一级斯托克斯光的转换效率(图 6)。随后, 他们通过提高输出镜对二级斯托克斯光的透过率、增大斯托克斯光束腰半径(360  $\mu\text{m}$ ) 以减小吸收损耗等方式将斜率效率提高到 84%, 接近量子极限(85.8%)。2010 年, Lubeigt 等<sup>[28]</sup> 利用调 Q 的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器做泵浦源, 采用内腔式结构实现了 1 240 nm、平均功率 375 mW 的脉冲激光输出。

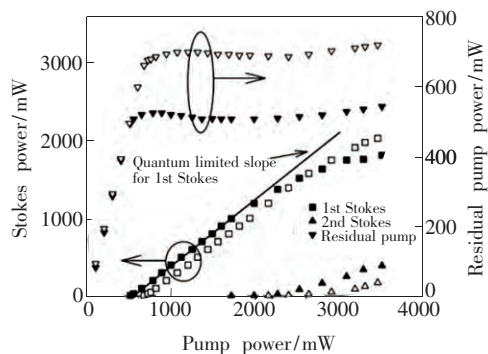


图 6 斯托克斯光功率、剩余光功率与泵浦光功率关系。实心图标为泵浦光沿  $[111]$  方向偏振, 空心图标为泵浦光沿  $[100]$  方向偏振<sup>[17]</sup>。

Fig. 6 Stokes powers and residual pump power for increasing pump input. Filled markers are for pump polarization aligned with  $[111]$ . Hollow markers are for pump aligned with  $[100]$ <sup>[17]</sup>.

2011 年, FEVE 等<sup>[23]</sup> 利用 1 030 nm 输出的 Yb: YAG 激光器做泵浦源, 获得了 24.5 W、1 193 nm 高功率脉冲输出。2012 年, Savitski 等<sup>[29]</sup> 实现

了 5.1 W、1 217 nm 拉曼激光的连续输出, 由于拉曼散射对光束的净化作用, 输出的斯托克斯光束质量( $M^2 \sim 1.1 \times 1.2$ ) 相比泵浦光( $M^2 \sim 8 \times 30$ ) 有了较大提高, 使输出光亮度( $B = P/(\lambda^2 M_x^2 M_y^2)$ ) 相对输入光提高了 43 倍。2012 年, Parrotta 等<sup>[30]</sup> 在谐振腔内加入双折射滤光片, 通过旋转双折射滤波片调节泵浦光波长, 实现了 1 209 ~ 1 256 nm 波段的拉曼光输出, 1 228 nm 处的输出功率为 4.4 W。随后, Kitzler 等<sup>[23]</sup> 又利用倍频技术(图 7) 实现了 604.5 ~ 619.5 nm 波长输出。

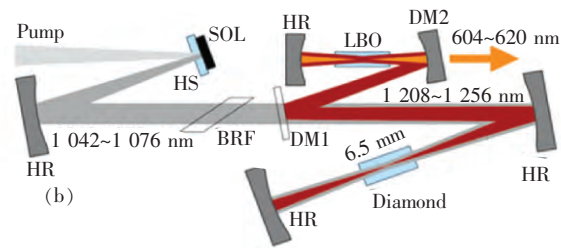


图 7 半导体碟片激光器泵浦的内腔式可调谐倍频输出拉曼激光装置<sup>[23]</sup>

Fig. 7 Experimental setup of SDL-pumped intra-cavity frequency-doubled tunable diamond Raman laser<sup>[23]</sup>

### 2.4 人眼安全波段

1.4 ~ 1.8  $\mu\text{m}$  是人眼安全波段, 该波段位于大气传输窗口, 在激光雷达、激光制导和目标识别等领域有广泛应用。与传统的获得人眼安全波段激光方式(掺钕激光器、光学参量振荡) 相比, 受激拉曼散射方法能够获得更高的输出功率、更好的光束质量。2011 年, Sabella 等<sup>[18-19]</sup> 利用 1 064 nm 激光泵浦人造金刚石晶体, 通过二阶拉曼频移实现了输出功率 1.63 W、斜率效率 56%、光束质量  $M^2$  为 1.05 的 1 485 nm 二阶斯托克斯光输出。实验发现, 通过改变输出镜透过率(图 8) 平衡泵浦光、一阶斯托克斯光、二阶斯托克斯光三者之间的转换效率可以有效地提高输出光的转换效率。

2011 年, Jelínek 等<sup>[24]</sup> 利用 1 340 nm Nd: YAP 激光器做泵浦源, 获得了波长 1 632 nm、脉宽 6 ns、脉冲能量 25  $\mu\text{J}$  的人眼安全激光输出。2012—2013 年, McKay 等<sup>[20-21]</sup> 通过改变输出镜对一阶斯托克斯光和二阶斯托克斯光的透过率、采用外腔结构, 得到了 14.5 W、1 485 nm 高功率脉冲激光输出, 斜率效率达 65%。



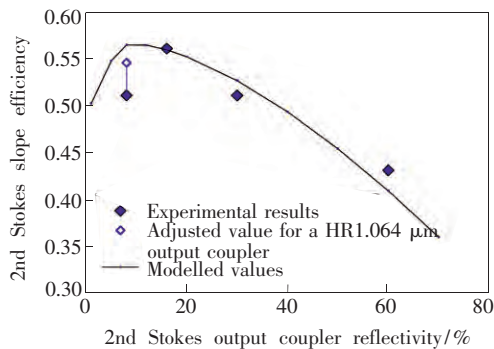
图8 二级斯托克斯光斜率效率与输出镜反射率关系<sup>[9]</sup>

Fig. 8 Dependence of slope efficiency of the second Stokes wavelength on the reflectivity of the output coupler<sup>[9]</sup>

## 2.5 中红外波段

中红外激光器在激光通信、激光制导、激光雷达、光谱分析和环境监测方面有重要应用,潘其坤等<sup>[3]</sup>介绍了中红外激光器的研究现状及其应用价值。2014年,Sabella等<sup>[2]</sup>利用波长可从2.3~2.5 μm调谐变化的光学参量振荡激光器作为泵浦源,实现了3.38~3.80 μm中红外波段拉曼激光输出。在3.7 μm处脉冲能量为80 μJ、斜率效率29%。分析实验结果发现(图9),由于人造金刚石晶体在2.5~3.75 μm处存在的三声子吸收效应、3.75~6 μm处的双声子吸收效应以及输出镜对较短波长的透过率较大,增加了斯托克斯光的损耗,使输出波长局限于3.38~3.80 μm。

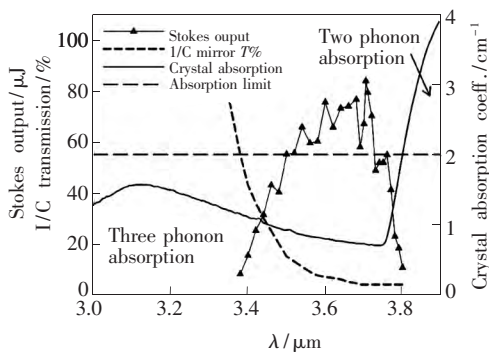
图9 3.38~3.80 μm斯托克斯光的平均脉冲能量,实线为双声子和三声子吸收率,虚线为金刚石透过率<sup>[2]</sup>。

Fig. 9 Average Stokes energies as the output wavelength from 3.38 to 3.80 μm. The solid and short dashed curves are the diamond absorption and input coupler transmission, respectively<sup>[2]</sup>.

## 2.6 高功率输出

在激光器高功率运转时,由于晶体对光的吸收而引起的热效应直接影响到激光器的输出特

性。人造金刚石晶体导热率相比其他晶体高两个数量级( $2000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),更适宜实现高功率输出。

2011年,Kitzler等<sup>[23]</sup>用1064 nm激光器作为泵浦源,实现了斜率效率为42%、功率为7.5 W的1240 nm准连续激光输出。同年又通过增强泵浦光聚焦程度提高了斜率效率(49.7%)和输出功率(11.3 W),其工作装置如图10所示<sup>[24]</sup>。

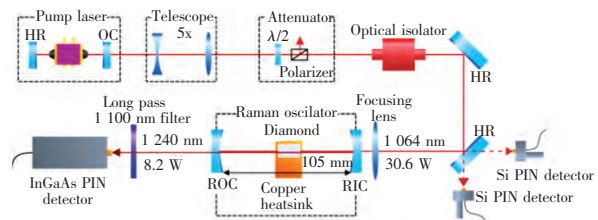
图10 高功率输出拉曼激光器的实验装置图<sup>[23]</sup>

Fig. 10 Experimental setup of Raman laser with high output power<sup>[23]</sup>

2014年,Williams等<sup>[25]</sup>通过理论分析,计算出人造金刚石的热分布稳定时间为53 μs。然后采用外腔结构,实现了108 W的准连续输出。实验结果(图11)表明,输出功率在前35 μs抖动严重,随着热分布的稳定而趋于平稳,这与理论预测相符。另外,他们还发现,由于金刚石晶体良好的导热性,在连续运转时能够高效散热,降低晶体中的热积累,有效提高了金刚石端面减反膜的损伤阈值。

2015年,Williams等<sup>[26]</sup>又利用光纤激光器做泵浦源,实现了381 W的1240 nm准连续(占空比20%)激光输出。通常,激光谐振腔内高功率

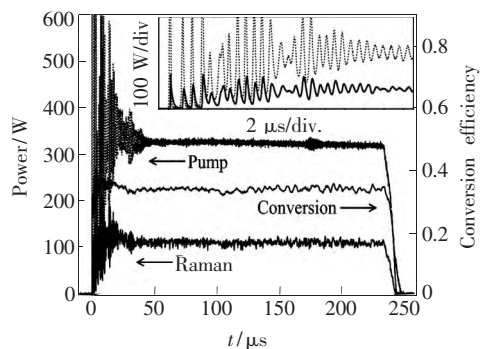
图11 输出功率为108 W时,泵浦光、拉曼光的脉冲波形以及对应的转换效率<sup>[26]</sup>。

Fig. 11 Shape of pump pulse, Raman pulse and corresponding conversion efficiency at 108 W Stokes output power<sup>[26]</sup>.

密度引起的热透镜焦距小于一定值时会造成激光的多模输出。但是,实验测得输出光仍为  $TEM_{00}$  模,高功率输出时拉曼光未受到热透镜效应的影响。他们根据 Klemens 模型<sup>[6]</sup>推测,这是由于金刚石的失相时间  $T_2$  小(7 ps),产生的光学声子在造成热效应之前就会扩散为声学声子,由于扩散(约 50  $\mu\text{m}$ )使热密度减小、热透镜焦距增加,从

而显著减小了热透镜效应对激光输出的影响。高功率运转时受热效应影响小、输出光束质量高是人造金刚石有别于其他晶体的显著优势。

如上文所述,科研人员利用人造金刚石晶体作为拉曼介质开展了大量相关工作,表 2 总结了目前基于人造金刚石晶体的拉曼激光器的研究现状。

表 2 基于人造金刚石的拉曼激光器研究现状

Tab. 2 Performance of Raman lasers based on synthetic diamond

| 输出波长                      | 年份   | 输出形式         | 输出功率             | 斜率效率 | 参考文献 |
|---------------------------|------|--------------|------------------|------|------|
| 273 nm                    | 2011 | 脉冲           | 60 mW            | 25%  | [4]  |
| 573 nm                    | 2008 | 脉冲(6.5 ns)   | 1.18 W           | 75%  | [5]  |
| 573 nm                    | 2010 | 脉冲(21 ps)    | 2.2 W            | 41%  | [7]  |
| 604.5 ~ 619.5 nm          | 2013 | 连续           | 1.5 W            | —    | [23] |
| 736.6 ~ 750.4 nm          | 2015 | 连续           | 85 mW            | 7%   | [27] |
| 890 nm                    | 2015 | 脉冲(65 fs)    | 820 mW           | 32%  | [8]  |
| 1 240 nm                  | 2010 | 脉冲           | 375 mW           | —    | [28] |
| 1 24 nm                   | 2010 | 脉冲(8 ns)     | 2 W              | 84%  | [7]  |
| 1 240 nm                  | 2011 | 连续           | 1.6 W            | 18%  | [24] |
| 1 217 nm                  | 2013 | 连续           | 5.1 W            | 12%  | [9]  |
| 1 209 ~ 1 256 nm          | 2013 | 连续           | 4.4 W            | 23%  | [30] |
| 1 240 nm                  | 2014 | 脉冲(9 ps)     | 2.75 W           | 76%  | [40] |
| 1 240 nm                  | 2014 | 准连续          | 108 W            | 34%  | [25] |
| 1 240 nm                  | 2015 | 准连续          | 381 W            | 61%  | [26] |
| 1 485 nm                  | 2011 | 脉冲           | 1.63 W           | 56%  | [24] |
| 1 485 nm                  | 2013 | 脉冲           | 14.5 W           | 65%  | [21] |
| 1.63 $\mu\text{m}$        | 2012 | 脉冲(6 ns)     | 47 $\mu\text{J}$ | —    | [34] |
| 3.38 ~ 3.80 $\mu\text{m}$ | 2014 | 脉冲(3 ~ 4 ns) | 80 $\mu\text{J}$ | —    | [22] |

## 4 总结与展望

随着晶体生长技术的发展,研究人员利用化学气相沉积(CVD)法制备出了高光学质量的金刚石晶体,基于人造金刚石晶体的拉曼激光器的相关研究得到了快速发展。利用人造金刚石做拉曼晶体,研究人员实现了从紫外到红外多个波段的拉曼激光输出。高功率激光器在军事、工业等领域有重要的应用价值,凭借人造金刚石导热率高、热膨胀系数低、抗损伤阈值高等优点,研究人员实现了 381 W 的高功率准连续输出。在实验中没有观察到由于热效应引起的功率饱和现象,因此,最

大输出功率还有提高的空间。研究人员利用人造金刚石吸收系数低、增益系数大等特性,实现了低阈值、高斜率效率(84%)的拉曼激光器。同时,由于拉曼散射对入射光的净化作用,输出的拉曼光光束质量高,使其在医药、环境检测等对激光光束质量有一定要求的领域有广阔的应用前景。由此可见,与传统的拉曼晶体相比,人造金刚石晶体具有更优良的光学和热学性质,这些性质可进一步提高固体拉曼激光器的性能。

国外的研究人员已经实现了从紫外到红外的部分波段的高功率、高效率、高光束质量的激光输出,国内尚没有相关研究报道。鉴于人造金刚石

具有拉曼增益系数大、导热率高、透过性好等优点,对生长高光学质量的人造金刚石晶体并对基于人造金刚石晶体的拉曼激光器的相关研究有助

于提高固体激光器的性能,使其在工业、军事、通讯、医药等领域有更佳的表现。

## 参 考 文 献:

- [1] TAKEI N, SUZUKI S, KANNARI F. 20-Hz operation of an eye-safe cascade Raman laser with a  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  crystal [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, 74(6):521-527.
- [2] MURRAY J T, POWELL R C, PEYGHAMBARIAN N, *et al.*. Generation of 1.5- $\mu\text{m}$  radiation through intracavity solid-state Raman shifting in  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  nonlinear crystals [J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20(9):1017-1019.
- [3] MOCHALOV I V. Laser and nonlinear properties of the potassium gadolinium tungstate laser crystal  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2:\text{Nd}^{3+}$ -(KGW:Nd) [J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(6):1660-1669.
- [4] MILDREN R P, PASK H M, CONVERY M, *et al.*. Efficient diode-pumped yellow, orange and red laser sources based on stimulated Raman scattering in  $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$  [J]. *Advanced Solid-State Photonics, Santa Fe, United States*, 2004:208.
- [5] SU K W, CHANG Y T, CHEN Y F. Power scale-up of the diode-pumped actively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> Raman laser with an undoped YVO<sub>4</sub> crystal as a Raman shifter [J]. *Appl. Phys. B*, 2007, 88(1):47-50.
- [6] LÜ Y F, CHENG W B, XIONG Z, *et al.*. Efficient CW laser at 559 nm by intracavity sum-frequency mixing in a self-Raman Nd:YVO<sub>4</sub> laser under direct 880 nm diode laser pumping [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, 7(11):787-789.
- [7] PASK H M, PIPER J A. Efficient all-solid-state yellow laser source producing 1.2-W average power [J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(21):1490-1492.
- [8] BUTLER J E. Optical probing of diamond chemical vapor deposition [J]. *Carbon*, 1990, 28(6):809.
- [9] ZHAN R J, GAO K L, ZOU Z P, *et al.*. Growth of diamond-like films by dc plasma chemical vapor deposition [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1990, 7(10):445-448.
- [10] JAMISON K D, SCHMIDT H K. Doped diamond laser: US, 5504767 [P]. 1996-04-02.
- [11] PRAWER S, NEMANICH R J. Raman spectroscopy of diamond and doped diamond [J]. *Philos. Trans. Royal Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.*, 2004, 362(1824):2537-2565.
- [12] GONCHAROV A F, CROWHURST J C. Pulsed laser Raman spectroscopy in the laser-heated diamond anvil cell [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, 76(6):063905-1-5.
- [13] TURRI G, CHEN Y, BASS M, *et al.*. Optical absorption, depolarization, and scatter of epitaxial single-crystal chemical-vapor-deposited diamond at 1.064  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Eng.*, 2007, 46(6):064002.
- [14] GRANADOS E, SPENCE D J, MILDREN R P. Deep ultraviolet diamond Raman laser [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(11):10857-10863.
- [15] MILDREN R P, BUTLER J E, RABEAU J R. CVD-diamond external cavity Raman laser at 573 nm [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(23):18950-18955.
- [16] MILDREN R P, RABEAU J R. *Optical Engineering of Diamond* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.
- [17] SABELLA A, PIPER J A, MILDREN R P. 1 240 nm diamond Raman laser operating near the quantum limit [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(23):3874-3876.
- [18] SABELLA A, PIPER J, MILDREN R P. Efficient 1 064 nm conversion to the eye-safe region using an external cavity diamond Raman laser [C]. *Proceedings of The International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2011, Sydney, Australia*, 2011:C725.
- [19] SABELLA A, PIPER J A, MILDREN R P. Efficient conversion of a 1.064  $\mu\text{m}$  Nd:YAG laser to the eye-safe region using a diamond Raman laser [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(23):23554-23560.
- [20] MCKAY A, KITZLER O, LIU H, *et al.*. High average power (11 W) eye-safe diamond Raman laser [J]. *SPIE*, 2012, 8551:85510U.
- [21] MCKAY A, LIU H, KITZLER O, *et al.*. An efficient 14.5 W diamond Raman laser at high pulse repetition rate with first (1 240 nm) and second (1 485 nm) Stokes output [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2013, 10(10):105801.

- [22] SABELLA A, PIPER J A, MILDREN R P. Diamond Raman laser with continuously tunable output from 3.38 to 3.80  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(13):4037-4040.
- [23] KITZLER O, MCKAY A, MILDREN R. CW diamond laser architecture for high average power Raman beam conversion [C]. *Proceedings of The International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim* 2011, Sydney, Australia, 2011: C1215.
- [24] KITZLER O, MCKAY A, MILDREN R P. Continuous-wave wavelength conversion for high-power applications using an external cavity diamond Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(14):2790-2792.
- [25] WILLIAMS R J, KITZLER O, MCKAY A, *et al.*. Investigating diamond Raman lasers at the 100 W level using quasi-continuous-wave pumping [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(14):4152-4155.
- [26] WILLIAMS R J, NOLD J, STRECKER M, *et al.*. Efficient Raman frequency conversion of high-power fiber lasers in diamond [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2015, 9(4):405-411.
- [27] SCHLOSSER P J, PARROTTA D C, SAVITSKI V G, *et al.*. Intracavity Raman conversion of a red semiconductor disk laser using diamond [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(7):8454-8461.
- [28] LUBEIGT W, BONNER G M, HASTIE J E, *et al.*. An intra-cavity Raman laser using synthetic single-crystal diamond [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(16):16765-16770.
- [29] SAVITSKI V G, FRIEL I, HASTIE J E, *et al.*. Characterization of single-crystal synthetic diamond for multi-watt continuous-wave Raman lasers [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2012, 48(3):328-337.
- [30] PARROTTA D C, KEMP A J, DAWSON M D, *et al.*. Tunable diamond Raman laser intracavity-pumped by an InGaAs semiconductor disk laser [C]. *Advanced Solid-State Photonics, Optical Society of America, San Diego, United States*, 2012: AM5A.5.
- [31] PARROTTA D C, KEMP A J, DAWSON M D, *et al.*. Multiwatt, continuous-wave, tunable diamond Raman laser with intracavity frequency-doubling to the visible region [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2013, 19(4):1400108.
- [32] LUBEIGT W, SAVITSKI V G, BONNER G M, *et al.*. 1.6 W continuous-wave Raman laser using low-loss synthetic diamond [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(7):6938-6944.
- [33] FEVE J P M, BOHN M J, BRASSEUR J K, *et al.*. High power Raman diamond laser [J]. *SPIE*, 2011, 7921:79121P.
- [34] JELÍNEK M, KITZLER O, JELÍNKOVÁ H, *et al.*. CVD-diamond external cavity Raman laser operating at 1 632 nm [C]. *Proceedings of The International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim* 2011, Sydney, Australia, 2011: C956.
- [35] 潘其坤. 中红外固体激光器研究进展 [J]. *中国光学*, 2015, 8(4):557-566.  
PAN Q K. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chin. Opt.*, 2015, 8(4):557-566. (in Chinese)
- [36] KLEMENS P G. Anharmonic decay of optical phonons [J]. *Phys. Rev.*, 1966, 148(2):845-848.
- [37] SPENCE D J, GRANADOS E, MILDREN R P. Mode-locked picosecond diamond Raman laser [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(4):556-558.
- [38] MURTAGH M, LIN J P, MILDREN R P, *et al.*. Efficient diamond Raman laser generating 65 fs pulses [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(12):15504-15513.
- [39] SAVITSKI V, HASTIE J, DAWSON M, *et al.*. Multi-watt continuous-wave diamond Raman laser at 1 217 nm [C]. *CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest, Munich, Germany*, 2011: PDA\_2.
- [40] WARRIER A M, LIN J P, PASK H M, *et al.*. Highly efficient picosecond diamond Raman laser at 1 240 and 1 485 nm [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(3):3325-3333.



陈志琼(1991-),男,山东莒南县人,硕士研究生,2014年于大连理工大学获得学士学位,主要从事脉冲激光技术及应用方面的研究。

E-mail: chenzhiqiong14@mails.ucas.ac.cn



付喜宏(1980-),男,内蒙古巴彦淖尔人,博士,副研究员,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事脉冲激光技术及应用方面的研究。

E-mail: fuxh@ciomp.ac.cn